

基于几何结构失真模型的图像质量评价研究

程光权¹ 张继东² 成礼智² 黄金才¹ 刘忠¹

摘要 客观图像质量评价研究的目的是设计一种和视觉感知保持一致,且适用于各种失真模型的质量评价方法.传统的结构相似度量质量评价方法忽视了自然图像本身的特点,不能很好地评判某些失真类型图像.本文根据人眼视觉系统(Human visual system, HVS)在感知图像质量过程中的特点,探索自然图像的本征几何结构特征,考虑像素点的方向失真、幅度失真和方差失真,提出了一种新型的基于图像几何结构失真模型的完全参考质量评价方法.在标准数据库上的实验结果表明,本文方法适用于所有失真模型图像数据的质量评价,计算复杂度相对较低,得到的图像客观评价结果和主观评价方法具有更好的一致性,能够很好地反映人眼对图像质量的主观感受.

关键词 图像质量评价,几何结构失真,视觉感知,人眼视觉系统

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.00811

Image Quality Assessment Based on Geometric Structural Distortion Model

CHENG Guang-Quan¹ ZHANG Ji-Dong² CHENG Li-Zhi² HUANG Jin-Cai¹ LIU Zhong¹

Abstract The goal of objective image quality assessment research is to automatically predict perceived image quality in a perceptually consistent manner, which should generally include all distortion types. It is found there is some deficiencies in traditional structural similarity index for image quality assessment by ignoring the geometric features of natural images, which fails to measure some particular distortion types. Inspired by the researches of quality prediction of human visual system (HVS) and the intrinsically geometric structural features of natural images, a novel geometric structural distortion model based full reference image quality assessment method is proposed in this paper. The distortion comparisons of direction, magnitude, and covariance are considered in our proposed method. The experimental results on standard image database show that our method is generally good for all distortion types and has relatively low computational complexity. It has a good consistency with the subjective assessment of human beings, thus, can be used to describe the visual perception of image quality.

Key words Image quality assessment, geometric structural distortion, visual perception, human visual system (HVS)

图像质量评价是图像与视频处理的基本算法,在各种图像和视频处理系统中,评估处理后的输出图像质量都是非常重要的,它是衡量图像和视频处理系统优劣的重要评价指标,同时可用于图像处理设计过程中算法优化和参数优选.根据在接收端对原始图像参考的程度,客观图像质量评价方法可分为三类^[1]:完全参考型、部分参考型^[2]和无参考型^[3].目前,研究者较多地关注完全参考型图像质量评价方法,即在接收端原始图像和失真图像都完全可利用,这也是通常意义上所说的质量评价,本文也是研究这种完全参考型质量评价方法.

客观图像质量评价研究的目标就是设计一种和人眼主观评价结果保持一致的质量评价标准,该质量评价标准对不同图像类型、不同失真类型以及不同失真程度等情况都应该取得一致的结论.传统的图像质量评价方法均方差(Mean square error, MSE)和峰值信噪比(Peak signal to noise ratio, PSNR)由于计算简单、数学理论清晰成为多年来应用最为广泛的客观评价标准.但这些方法并没有考虑人眼视觉系统(Human visual system, HVS)特性,以及自然图像本身具有的特点,只是对两幅图像之间的误差进行了简单的数学统计,虽然能将误差进行量化表达,却不能真实反映图像的视觉感知质量,其准确性相对较差,有时候甚至导致和人眼主观判别相反的结论.近年来,随着对人眼视觉系统特性以及生理神经学等领域研究的深入,研究人员提出了一系列新型的图像质量评价方法,客观图像质量评价方法的研究也由传统的误差统计发展到视觉感知特性上来,基于人眼视觉特性的图像质量评价方法不断出现,如Heeger等的矩阵模型^[4]、Bradley的小波域的视觉差异预测模型(Wavelet visible

收稿日期 2009-12-02 录用日期 2010-09-15
Manuscript received December 2, 2009; accepted September 15, 2010

国家自然科学基金(71001105, 70771109, 70701038, 71071160)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (71001105, 70771109, 70701038, 71071160)

1. 国防科学技术大学信息系统与管理学院信息系统工程重点实验室 长沙 410073 2. 国防科学技术大学理学院 长沙 410073

1. Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073
2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073

difference predictor, WVDP)^[5] 等. 然而, 由于人眼视觉系统是一个高度复杂、高度非线性的系统, 目前人们对 HVS 的认知有限, 尚无法建立一个精确的、统一的 HVS 模型, 故只能利用 HVS 系统的部分特性并依据一定的假设前提进行, 且大多计算较为复杂, 这些局限使得基于 HVS 的质量评价方法目前仍未能取得显著提高的结果, 但随着越来越多的研究者投入这个领域, 各种新型客观评价方法正不断涌现. 最近, 文献 [6] 中提出的方法考虑失真图像的结构信息损失, 认为人眼视觉系统的主要功能是提取图像和视频中的结构信息, 因此, 提出基于结构相似度 (Structural similarity index, SSIM) 的图像质量评价标准, 仿真实验结果证明了该方法优于经典方法, 更加符合人眼视觉系统特性, 吸引了较多关注^[7-8]. 但是随着深入研究发现, 符合人眼视觉系统感知过程的结构信息定义是一个开放性的问题, 文献 [6] 提出的结构相似度没有考虑自然图像的特点, 存在一些不足, 并且不能很好地预测某些失真类型的图像质量. 例如, 对模糊图像数据库实验的效果就不尽如人意. 另外, 最近文献 [9] 提出的基于图像视觉信息提取的 VIF (Visual information fidelity) 方法和文献 [10] 提出的基于小波的视觉信噪比 (Visual signal-to-noise ratio, VSNR) 方法也都取得了很好的仿真实验结果.

本文主要从另外一个角度研究图像的几何结构信息失真在质量评价方法中的应用. 区别于一维信号和二维随机信号, 二维自然图像具有其特有的几何结构, 这些几何结构信息构成了自然图像中各种具有物理意义的人眼感知信息, 人眼视觉系统在感知图像质量的过程中, 主要是衡量这些结构信息变化是否破坏了其固有的物理属性. 因此, 本文在图像质量评价过程中, 不同于传统的信号统计结构信息, 考虑图像的几何结构信息失真情况, 主要包含方向结构和几何正则结构等信息失真度量, 设计一种完全参考的适用所有失真模型的质量评价方法, 并在不同图像的不同程度失真模型数据库上验证本文方法的有效性. 第 1 节研究图像的几何结构模型, 详细说明了基于几何结构失真模型图像质量评价算法的设计过程; 第 2 节在典型图像数据库上实验本文方法, 与经典质量评价方法相比, 验证本文方法的有效性; 最后, 第 3 节对全文内容进行总结.

1 几何结构失真模型

自然图像作为一类特殊的二维信号, 人眼能够感知并识别图像中包含的各自不同的信息, 最重要的一点就是二维图像信号具有几何结构特性, 这些几何结构信息构成了图像中具有物理含义的各种目标, 人眼视觉系统在感知图像质量的过程中, 对这些

几何结构信息的变化十分敏感. 例如, 在符合人眼视觉系统特性的图像三构件模型中^[11], 将图像分割为边缘、纹理 (弱边缘) 和平坦区域 3 部分组成, 理论及实验证明, 边缘对视觉感知起决定性作用, 纹理次之, 平坦区域只能起陪衬作用. 这就是说, 边缘 (包括弱边缘) 是图像中影响视觉效果的主要因素. 另外, 最近新发展的图像处理算法, 为了提高系统效率, 增强输出结果图像的视觉质量, 已经考虑了自然图像的这种几何结构特征, 并取得了很大的进展^[12]. 例如, 在图像处理中广泛应用的传统小波变换, 是通过在水平和垂直方向分别应用一维小波变换实现, 在处理图像奇异性结构时效果不太理想, 新近发展的基于方向预测的新型小波变换^[13], 考虑了图像的几何结构信息, 图像处理结果的视觉效果得到显著提高. Wang 等提出的基于传统结构相似的图像质量评价方法中^[6], 仅考虑通常的信号统计结构信息, 忽视了自然图像这类特殊的二维信号具有的这种几何结构特性, 而这部分正是人眼视觉系统感知图像质量过程中感兴趣的部分, 也是自然图像特有的本征结构属性. 因此, 本文考虑通过度量这种几何结构信息的失真来预测失真图像质量, 从而建立一种新的图像质量评价方法. 如何定量地刻画这些几何结构特征, 是建立几何结构失真模型的基础. 这里主要考虑影响几何结构的几个重要成分: 正则化方向失真、幅度失真以及局部方差失真. 比较原图像和失真图像中这些几何结构成分的变化情况, 就能预测失真图像的质量, 这个结构符合人眼视觉系统感知图像质量过程, 得出的结果将和主观评价结果具有更好的一致性.

1.1 方向失真

在二维图像的几何结构特征中, 最重要的一点就是方向性. 自然图像作为一类特殊的二维信号, 区别于一维信号和二维随机信号, 其中, 很重要的一点就是二维图像中像素点结构具有一定的方向性, 称为正则化方向. 最近发展的考虑了像素方向结构的图像处理算法^[13], 都取得了很好的效果, 这也说明了方向特性对自然图像的重要性. 因此, 在本文的几何结构框架中, 首先考虑图像像素点的方向特性.

确定了每个像素的正则化方向, 构成整幅图像的方向图, 这样, 比较失真图像和原图像方向图的变化情况, 就反映了图像几何结构的变化情况, 从而确定图像的失真度量. 为了计算图像像素点的方向, 注意到图像的梯度性质和方向的关系, 在一个包含边缘的区域内, 像素的正则化方向平行于切线方向, 而梯度方向垂直于切线方向, 如图 1 所示, C 为经过点 (i, j) 的一段边缘, $v(i, j)$ 为该点切线向量, $d(i, j)$ 为该点的梯度向量, 因此, 可以简单地利用梯度信息

描述图像的正则化方向.

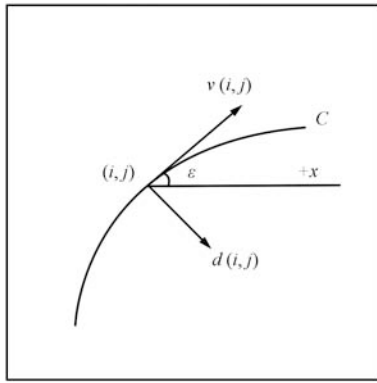


图 1 正则化方向

Fig. 1 The regular direction

$$\theta_{i,j} = \tan^{-1} \frac{\partial f_y(i,j)}{\partial f_x(i,j)} + \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

其中, $\theta_{i,j}$ 表示该点的正则化方向和 $+x$ 数轴的夹角, $f_x(i,j)$ 和 $f_y(i,j)$ 分别表示图像在 (i,j) 点的水平和垂直方向梯度, 对非边缘区域也可以同样定义. 图像的梯度通过 Sobel 梯度算子计算, 其中, 水平和垂直方向的 Sobel 算子如图 2 所示.

-1	0	+1
-2	0	+2
-1	0	+1

-1	-2	-1
0	0	0
+1	+2	+1

图 2 水平和垂直方向的 Sobel 算子

Fig. 2 The horizontal and vertical Sobel operators

如图 3 所示是局部 Lena 图像的正则化方向示意图. 显然, 确定了每个像素点的正则化方向以后, 原图像和失真图像在该像素点的方向差决定了该位置的正则化方向改变程度. 设 $\Delta\theta_{i,j}$ 为 (i,j) 位置原图像和失真图像方向差, 定义如下:

$$\Delta\theta_{i,j} = |\theta_{i,j}^f - \theta_{i,j}^g| \quad (2)$$

其中, $\theta_{i,j}^f$ 和 $\theta_{i,j}^g$ 分别表示原图像 f 和失真图像 g 在 (i,j) 位置正则化方向和 $+x$ 数轴的夹角. 显然, 当 $\Delta\theta_{i,j} = \pi/2$ 时, 表示正则化方向改变最严重, 而 $\Delta\theta_{i,j} = 0$ 或 π 时, 则表示方向没有改变. 这个性质和余弦函数的性质相似, 因此, 这里通过下面公式定

义原图像和失真图像在点 (i,j) 的方向失真:

$$GD_{i,j} = |\cos(\text{mod}(\Delta\theta_{i,j}, \pi))| = |\cos(\theta_{i,j}^f - \theta_{i,j}^g)| \quad (3)$$

其中, mod 表示模值函数. 根据式 (1) 和式 (3) 可推得:

$$GD_{i,j} = \frac{|\partial f_x(i,j) \cdot \partial g_x(i,j) + \partial f_y(i,j) \cdot \partial g_y(i,j)| + C_1}{\sqrt{\partial f_x^2(i,j) + \partial f_y^2(i,j)} \cdot \sqrt{\partial g_x^2(i,j) + \partial g_y^2(i,j)} + C_1} \quad (4)$$

其中, 分子分母中添加常数 C_1 是为了避免分母等于或接近于 0 时, 出现不稳定情况. 可以简单地验证, 方向失真的定义式是对称的, 取值范围是 $[0, 1]$, 数值越小, 表示方向失真越严重, 当且仅当 $\theta_{i,j}^f = \theta_{i,j}^g$ 时, 函数取得最大值 1, 表示没有方向失真.

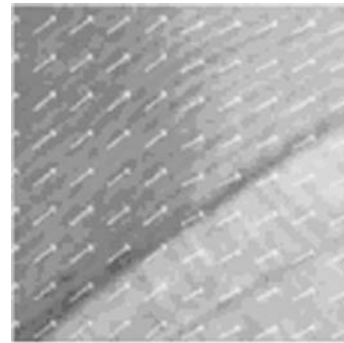


图 3 图像的方向示意图

Fig. 3 The directional map of image

1.2 幅度失真

另外, 边缘和纹理等图像奇异性特征的强度也是几何结构中十分重要的成份, 可以用来衡量局部奇异性对比度的变化情况. 在计算正则化方向的过程中, 采用了像素的水平和垂直方向梯度定义方向变化, 我们注意到, 梯度的幅值可以反映该点奇异性强度. 因此, 本文将像素点的梯度幅值作为图像几何结构特征的另一个因子, 在图像质量评价中比较失真图像和原图像梯度幅值的变化情况.

$$m_{i,j} = \sqrt{\partial f_x^2(i,j) + \partial f_y^2(i,j)} \quad (5)$$

其中, $m_{i,j}$ 表示图像在点 (i,j) 的梯度幅值. 为了和方向失真定义式的性质保持一致, 这里类似地定义幅值失真如下:

$$GM_{i,j} = \frac{2m_{i,j}^f \cdot m_{i,j}^g + C_2}{(m_{i,j}^f)^2 + (m_{i,j}^g)^2 + C_2} \quad (6)$$

其中, $m_{i,j}^f$ 和 $m_{i,j}^g$ 分别表示原图像 f 和失真图像 g 在点 (i, j) 的梯度幅值. 常数 C_2 和式 (4) 中的常数 C_1 功能相同, 避免幅度失真定义式出现不稳定情况, 特别地, 这里选择 $C_2 = 2C_1$. 梯度幅值失真定义式也是对称的, 取值范围 $[0, 1]$, 数值越小, 则表示幅度失真越严重. 注意到, 文献 [14] 中也将图像梯度信息应用于图像质量评价中, 但是作者主要是在图像梯度域利用 SSIM^[6] 方法来衡量图像质量, 并没有意识到梯度信息中所能包含的更进一步的正则化方向信息的失真, 但正因为梯度信息也包含了一部分的几何结构信息, 因此, 文献 [14] 中的方法也获得了一定提高. 而本文方法是直接挖掘自然图像本质的正则化结构信息, 只是利用梯度信息来定义图像的这种和方向有关的几何结构失真, 能够更直接更准确地描述图像质量的视觉感知过程, 物理意义更加明确, 更加符合人眼视觉系统特性.

1.3 方差失真

图像几何结构特征中, 边缘的几何正则性是其中一个十分重要的特性^[12, 15], 反映图像边缘的锐利程度, 对图像的视觉质量有着十分重要的影响. 我们注意到包含一段边缘的二维图像局部区域内, 图像像素点灰度值沿平行于边缘的方向变化是正则的或者说是缓慢的, 而在垂直于边缘或纹理的方向上, 图像灰度值变化剧烈. 边缘的这种几何正则性可以刻画人眼视觉系统对边缘的锐利程度和人工现象的感知情况, 因此, 图像处理的很多领域都在探索研究边缘的几何正则性, 以期取得具有更好视觉效果图像处理结果. 文献 [15] 的图像插值算法设计过程中, 研究了如何保持高分辨率图像的几何正则一致性的问题. 研究发现, 图像的局部方差可以很好地描述边缘的这种几何正则信息, 基于局部方差的边缘自适应插值方法设计得到的高分辨率图像具有很好的视觉质量. 因此, 本文采用图像的局部方差作为图像几何结构的第 3 个因子, 通过局部方差的比较反映图像边缘的几何正则性变化情况. 设 $\sigma_{i,j}^f$ 和 $\sigma_{i,j}^g$ 分别表示原图像和失真图像在点 (i, j) 的局部方差, 类似于方向失真和幅度失真的定义式, 局部方差失真定义如下:

$$GC_{i,j} = \frac{2\sigma_{i,j}^f \sigma_{i,j}^g + C_3}{(\sigma_{i,j}^f)^2 + (\sigma_{i,j}^g)^2 + C_3} \quad (7)$$

其中, 常数 C_3 的存在同样是为了避免公式出现不稳定情况. 另外, $\sigma_{i,j}^f$ 和 $\sigma_{i,j}^g$ 通过以点 (i, j) 为中心的一个局部窗口的方差作为该点的方差计算获得. 显然, 局部方差失真的定义式也是对称的, 取值范围是 $[0, 1]$, 数值越小, 表示方差失真越严重.

联合以上三个因子, 就可以得到本文的几何结

构失真度量, 这里简单地采用如下公式定义点 (i, j) 的几何结构失真:

$$GSD_{i,j} = (GD_{i,j})^\alpha (GM_{i,j})^\beta (GC_{i,j})^\gamma \quad (8)$$

其中, $\alpha > 0$, $\beta > 0$, 和 $\gamma > 0$ 三个参数用来调整各个分量的相对重要性, 本文简单地选择 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 的情形. 联合式 (4) ~ (8), 可以推得

$$GSD_{i,j} = \frac{2|\partial f_x(i,j)\partial g_x(i,j) + \partial f_y(i,j)\partial g_y(i,j)| + C_2}{\partial f_x^2(i,j) + \partial f_y^2(i,j) + \partial g_x^2(i,j) + \partial g_y^2(i,j) + C_2} \times \frac{2\sigma_{i,j}^f \cdot \sigma_{i,j}^g + C_3}{(\sigma_{i,j}^f)^2 + (\sigma_{i,j}^g)^2 + C_3} \quad (9)$$

可以发现, 几何结构失真这个定义式是对称的, 取值范围 $[0, 1]$, 数值越小, 表示几何结构失真越严重, 和三个分量的定义式具有相同的性质. 最后, 通过所有像素点位置上的几何结构失真的平均 (Mean geometric structural distortion, MGSD) 来定义整幅图像的几何结构失真.

$$MGSD(f, g) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} GSD_{i,j} \quad (10)$$

其中, $[M, N]$ 表示图像的大小. 本文定义的几何结构失真, 从全新的角度考虑二维图像信号所具有的独特结构, 充分考虑了自然图像区别于一维信号和通常的二维随机信号所具有的本征特征, 这些几何结构信息决定了自然图像的视觉质量, 因此, 提出的基于几何结构失真的图像质量评价方法, 具有直观的物理意义, 符合人眼视觉系统对图像质量感知的特点. 下一节将在各种失真模型图像数据库上实验本文方法, 与现有的主要质量评价方法比较, 验证本文方法是符合人眼视觉系统特性, 与主观评价结果具有更好的一致性.

2 数值实验

为了测试本文提出的质量评价方法, 并和已有方法比较, 这里用美国 TEXAS 大学 Laboratory for image and video engineering (LIVE) 的图像数据库 2 进行仿真实验^[16], 该库包含 29 幅高分辨率的 RGB 图像和一系列各种失真模型的失真图像. 其中, 包含 5 种失真模型: JPEG2000 压缩失真模型, JPEG 压缩失真模型, 白噪声 (记为 Wn) 失真模型, 高斯模糊 (记为 Gblur) 失真模型和 Rayleigh 衰落道模型下的 JPEG2000 比特流传输误差 (记为 FF) 失真模型, 共 779 幅失真图像, 如图 4 所示为 LIVE 图像库中一个各种失真模型的样本. 同时, 该图像库还

给出了每幅图像的 DMOS (Differential mean opinion score) 值, DMOS 值由观测者给出的原始质量分数经过处理后得到, DMOS 值越小的图像主观质量越好. 实验中, 本文方法的参数设定为 $C_1 = 0.01$, $C_2 = 0.02$, $C_3 = K \cdot L$, $K = 0.01$, L 代表像素的动态变化范围. 实验采用 PSNR、SSIM^[6]、VIF^[9] 以及 VSNR^[10] 和本文方法 MGSD 分别对图像序列进行质量预测, 实验方法应用于灰度图像, 其中, 彩色图像与灰度图像通过下式转换.

$$I = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B \quad (11)$$

其中, R , G , B 分别表示彩色图像的红色、绿色和蓝色分量.

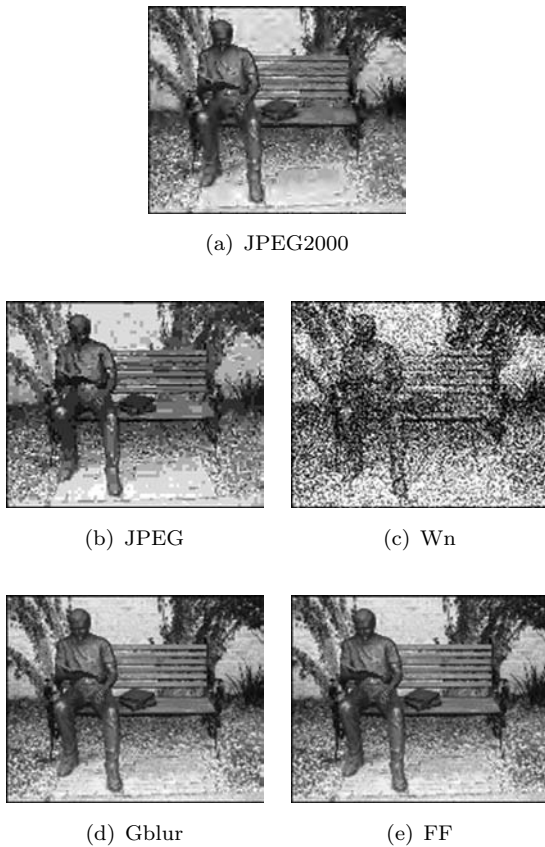


图 4 LIVE 图像库中样本

Fig. 4 The samples of LIVE image database

为了客观量化地比较本文方法和其他方法的优劣, 根据 VQEG (Video quality evaluation group) 提出的准则^[17], 通常认为在客观评价值和主观评价值之间存在一定的非线性关系, 这里采用下面的函数^[10] 建立这种非线性映射关系:

$$f(x) = \frac{\tau_1 - \tau_2}{1 + \exp\left(\frac{x - \tau_3}{\tau_4}\right)} + \tau_2 \quad (12)$$

其中, x 表示客观评价值, τ_1 , τ_2 , τ_3 , 和 τ_4 为模型参数, 通过 Matlab 中非线性优化函数获得. 在建立非线性映射之后, 选用以下三个度量指标来比较各种方法的优劣: 1) 相关系数 (Correlation coefficient, CC), 客观评价和主观评价值之间的相关系数, 反映预测的精确性, 数值越大表明模型预测越好; 2) Spearman 秩相关系数 (Spearman rank-order correlation coefficient, SROCC), 反映预测的单调性, 即模型预测值与主观值相对幅度的一致程度, 数值越大表明模型预测越好; 3) 离出率 (Outlier ratio, OR), 反映客观评价的一致性, 数值越小则表明模型预测越好.

以高斯模糊失真类型 (Gblur) 数据为例, 图 5 显示了 PSNR, SSIM, VSNR, VIF 和本文方法 MGSD 的客观评价结果和图像主观评价结果 DMOS 的散点图, 图 5 中每个点代表一幅测试图像, 横、纵坐标值分别为模型预测值和 DMOS 值. 根据散点图的收敛程度可直观地看出模型预测与主观分数的一致性. 对于 Gblur 失真类型数据, 由散点图观察到, PSNR 方法预测质量值与 DMOS 相关性最差; SSIM 方法预测值与 DMOS 相关性显著高于 PSNR, 但 SSIM 方法在图像严重失真情况下准确性较差 (直观上, DMOS 大于 50 时, 散点图上的点较分散); VSNR 方法预测质量结果数值范围较大、不规范, 且在图像微弱失真情况下准确性较差; VIF 方法的预测质量值与 DMOS 方法要优于前面几种方法, 具有较好的收敛性; 本文方法 MGSD 的预测质量与 DMOS 的相关性较高, 优于 SSIM 和 VSNR 方法, 与 VIF 方法相当.

表 1 列出了在 LIVE 图像库上几种测试方法对所有失真模型数据测试的客观度量指标结果比较, 从数值实验的结果可以发现本文方法的三项指标总体优于 PSNR、SSIM 以及 VSNR, 和 VIF 方法相当. 对个别失真类型研究发现, 由于白噪声只是单个像素点失真, 与内容无关, 较少地破坏自然图像的几何结构特征, 而 PSNR 正是对像素点绝对误差的数学统计, 比较适合这种失真情况, 因此, 不难理解 PSNR 方法对白噪声失真模型数据的预测准确性优于本文方法和其他方法, 但本文方法的预测结果准确度也是很高的, 优于 SSIM 和 VSNR. 而对其他各种失真模型预测实验结果发现, 本文方法预测结果性能都要明显优于 PSNR, SSIM 和 VSNR 方法, 具有更高的预测精度 (CC)、更高的预测单调性 (SROCC) 和更低的离出率 (OR), 且性能提高的幅度较为显著, 与 VIF 方法实验结果相近. 对包含所有失真模型图像数据的混合实验结果研究发现: CC 值从 PSNR 的 0.8709, SSIM 的 0.9031 以及 VSNR 的 0.9006, 增加到本文方法的 0.9394, 与

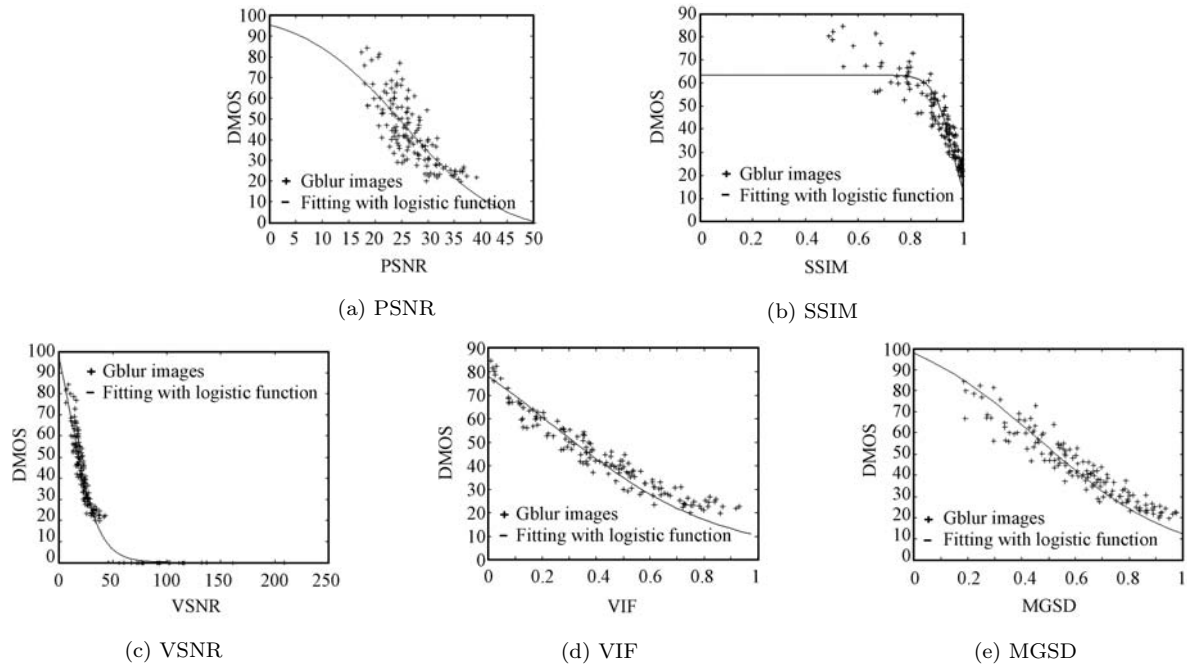


图 5 Gblur 失真类型数据模型预测质量值与 DMOS 对比的散点图

Fig. 5 Scatter plots of DMOS versus model prediction for Gblur distortion type

表 1 LIVE 图像库几种客观评价方法性能指标比较

Table 1 Performance metrics comparison of tested methods

	JPEG2000	JPEG	Wn	Gblur	FF	All
<i>CC</i> (预测精度)						
PSNR	0.8964	0.8604	0.9846	0.7849	0.8925	0.8709
SSIM	0.9561	0.9436	0.9706	0.9406	0.9439	0.9031
VSNR	0.9532	0.9429	0.9781	0.9342	0.9023	0.9006
VIF	0.9577	0.9235	0.9822	0.9758	0.9610	0.9501
MGSD	0.9655	0.9512	0.9785	0.9608	0.9510	0.9394
<i>SROCC</i> (预测单调性)						
PSNR	0.8893	0.8417	0.9855	0.7729	0.8785	0.8209
SSIM	0.9525	0.9123	0.9693	0.9467	0.9510	0.9356
VSNR	0.9463	0.9082	0.9789	0.9403	0.9125	0.9194
VIF	0.9535	0.9136	0.9851	0.9734	0.9653	0.9533
MGSD	0.9719	0.9343	0.9711	0.9757	0.9779	0.9583
<i>OR</i> (预测一致性)						
PSNR	0.0661	0.0912	0.0000	0.2069	0.1517	0.0760
SSIM	0.0429	0.0358	0.0000	0.0414	0.0345	0.0360
VSNR	0.0336	0.0387	0.0000	0.0373	0.0399	0.0358
VIF	0.0296	0.0214	0.0000	0.0257	0.0278	0.0216
MGSD	0.0325	0.0246	0.0000	0.0304	0.0217	0.0258

VIF 方法的 0.9501 相近; *SROCC* 值从 PSNR 的 0.8209, SSIM 的 0.9356 以及 VSNR 的 0.9194, 增加到本文方法的 0.9583, 同时优于 VIF 方法的 0.9533; 而 *OR* 值则从 PSNR 的 0.0760, SSIM 的 0.0360 以及 VSNR 的 0.0358, 降低为本文方法的 0.0258, 与 VIF 的 0.0216 可比较.

单个失真模型图像数据的分别实验, 以及所有失真模型图像数据的总体实验, 都表明了本文方法对失真图像质量评价具有较好的预测性能, 优于 PSNR, SSIM 和 VSNR 方法, 与 VIF 方法相当. 而与 VIF 相比较, 本文方法的物理意义清晰, 可以更直接地应用于图像处理算法的优化设计中, 在图像和视频处理系统中有着广阔的应用前景.

接下来, 我们验证本文方法的灵敏性和合理性. 图 6 给出了 4 幅失真程度不同的“Monarch”降质图像, 主观评价质量明显不同, 但是 PSNR 却几乎相同. 显然, PSNR 在很多情况下并不能真正有效地反映图像的视觉质量. 表 2 给出了 SSIM 和本文方法 MGSD 对这 4 幅图像的客观质量预测值. 从实验结果可以看出本文方法对失真图像质量预测的结果和主观评判是一致的, 图 6 (b) 的视觉质量最好, 其

对应的 MGSD 值为 0.6571 是最大的, 图 6 (d) 的视觉质量最差, 其对应的 MGSD 值为 0.1992 是最小的. 同时注意到, 本文方法的辨识度比 SSIM 方法更灵敏, 图 6 (a) 和图 6 (c) 视觉质量相异, 可是其对应的 SSIM 差异微小 (相差 0.0067), 而对应的 MGSD 结果差异增大 (相差 0.0304), 类似的, 图 6 (d) 视觉质量最差, 而对应的 SSIM 方法结果与其他几幅图像的结果差异度较小, 本文方法 MGSD 预测的结果就能较好地反映人眼预测的结果, 能够更好地和人眼预测一致, 区分失真图像质量的差别.

为了更好地解释上述实验结果, 验证本文方法能够更好地反映人眼视觉系统在感知图像几何结构失真的特点, 揭示基于几何结构失真方法的物理背景, 图 7 给出了“Monarch”图像在 JPEG2000 和 Gblur 两种失真情况下的 SSIM 图和 MGSD 图比较. 观测失真图像数据可以发现, 失真图像造成视觉质量的降低, 主要发生在图像边缘等细节信息丰富处, MGSD 方法产生的几何结构失真图能够更全面地描述图像中视觉感兴趣结构部分的失真情况, 而 SSIM 方法产生的传统结构失真图较为粗糙, 对整体图像的细节信息失真描述不够全面.

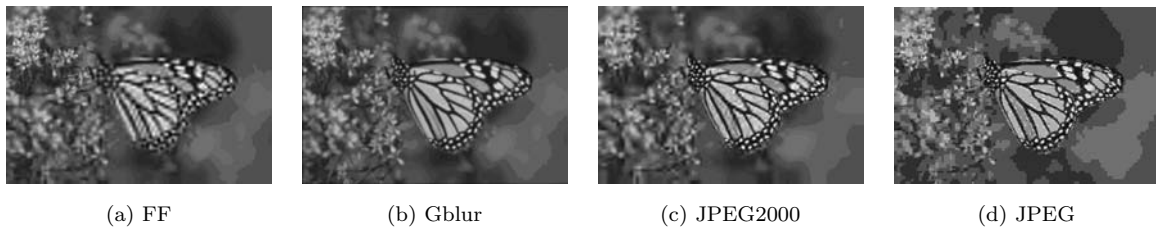


图 6 相同 PSNR 值的几幅失真图像
Fig. 6 The distorted images with same PSNR

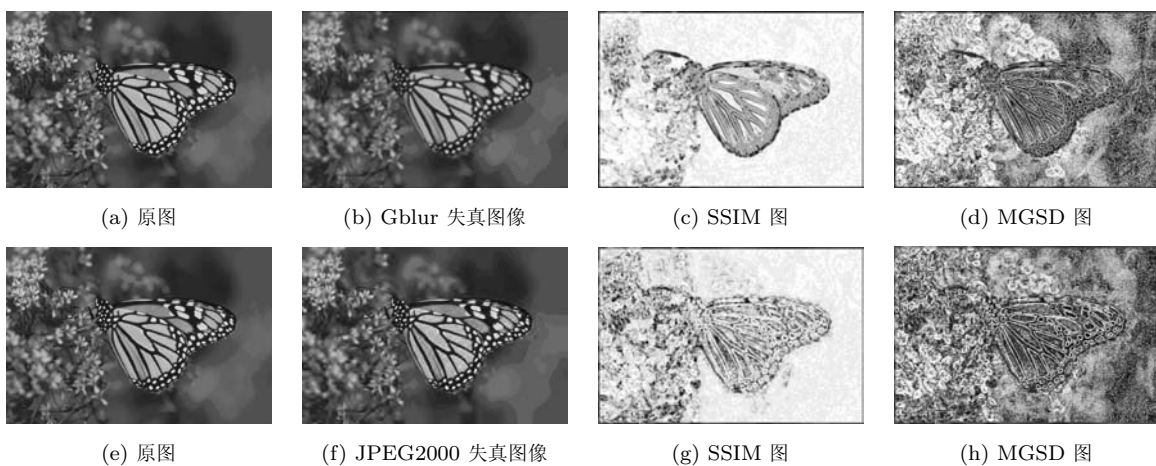


图 7 SSIM 图和 MGSD 图比较
Fig. 7 Comparison of SSIM maps and MGSD maps

表 2 图 6 中失真图像的质量预测比较

Table 2 The predicted values comparison of distorted images in Fig. 6

	FF	Gblur	JPEG2000	JPEG
PSNR	23.7218	23.7290	23.7258	23.7247
SSIM	0.7614	0.8798	0.7681	0.7203
MGSD	0.5075	0.6571	0.5379	0.1992

同时, 我们通过算法的运算时间来简单地估计各种方法的计算复杂度, 比较各种算法的运算效率. 对一幅大小为 768 像素 \times 512 像素的图像 (LIVE 图像库中典型图像大小), 在相同配置的一台计算机上, PSNR 运算时间约为 0.063 秒, SSIM 运算时间约为 0.890 秒, VSNR 运算时间约为 0.850 秒, VIF 运算时间约为 7.610 秒, 本文方法运算时间约为 1.290 秒, 可以看出, 本文方法计算量比 PSNR 方法大, 与 SSIM 和 VSNR 相当, 比 VIF 方法计算量小.

数值实验说明了本文考虑自然图像的本征特征提出的基于几何结构失真的图像质量评价方法具有明确的物理意义, 更加符合人眼对图像质量的主观感受, 适用于所有失真模型图像数据的质量评价, 与人眼的主观预测结论一致, 具有较好的灵敏度, 同时, 算法复杂度相对较低, 在图像处理算法的优化设计中有着广阔的应用前景, 在标准图像库 LIVE 上的仿真实验结果与 PSNR、SSIM 和 VSNR 方法相比有较大的提高, 与 VIF 方法实验结果相当.

3 总结

图像质量评价方法研究是最近图像与视频处理领域的一个热点问题, 传统的质量评价不能真实反映图像的主观感知质量. 最近发展的基于结构相似性的图像质量评价方法从信号结构出发直接应用于图像中, 没有注意到自然图像作为一类特殊的二维信号, 具有的本征几何结构特征, 存在一些不足, 和人眼感知图像数据质量特点并不十分符合, 不能较好地预测某些失真模型图像数据质量. 本文考虑二维图像的方向和几何正则性等本征的几何结构特征, 提出的新型有效的基于几何结构失真模型的图像质量评价方法, 具有明确的物理意义, 计算复杂度较低, 符合人眼感知图像质量的特点, 在 LIVE 图像数据库上的实验结果表明, 本文方法适用于所有失真模型图像数据质量预测, 具有较好的区分灵敏度, 相比 PSNR、SSIM 和 VSNR 方法具有更高的预测精度、更高的预测单调性和更低的离出率, 与主观评价之间具有更好的一致性, 能有效预测图像质量, 与 VIF 方法性能接近. 本文方法在图像和视频处理系统中有着广阔的应用前景, 研究利用本文提出的

图像质量评价方法指导图像处理算法的设计与优化, 得到具有更好主观质量的输出结果是图像质量评价方法的一个很有意义的工作, 也是下一步研究的重点.

References

- 1 Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(11): 3440–3451
- 2 Cheng G, Cheng L. Reduced reference image quality assessment based on dual derivative priors. *Electronics Letters*, 2009, **45**(18): 937–939
- 3 Suresh S, Babu R V, Kim H J. No-reference image quality assessment using modified extreme learning machine classifier. *Applied Soft Computing*, 2009, **9**(2): 541–552
- 4 Heeger D J, Teo T C. A model of perceptual image fidelity. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Washington D. C., USA: IEEE, 1995. 343–345
- 5 Bradley A P. A wavelet visible difference predictor. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(5): 717–730
- 6 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, Simoncelli E P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600–612
- 7 Wang Z, Bovik A C. Mean squared error: love it or leave it? A new look at signal fidelity measures. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, **26**(1): 98–117
- 8 Chang J, Alain B, Ostromoukhov V. Structure-aware error diffusion. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, **28**(5): 162.1–162.8
- 9 Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(2): 430–444
- 10 Chandler M, Hemami S S. VSNR: a wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(9): 2284–2298
- 11 Ran X, Farvardin N. A perceptually motivated three-component image model-part I: description of the model. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(4): 401–405
- 12 Peyre G, Mallat S. Orthogonal bandelet bases for geometric images approximation. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2008, **61**(9): 1173–1212
- 13 Xu J, Wu F, Liang J, Zhang W. Directional lapped transforms for image coding. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, **19**(1): 85–97
- 14 Yang Chun-Ling, Chen Guan-Hao, Xie Sheng-Li. Gradient information based image quality assessment. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(7): 1313–1317
(杨春玲, 陈冠豪, 谢胜利. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究. *电子学报*, 2007, **35**(7): 1313–1317)
- 15 Li X, Orchard M T. New edge-directed interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(10): 1521–1527

16 Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, Bovik A C. Live image quality assessment database release2 [Online], available: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, April 24, 2011

17 VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [Online], available: http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv_phaseII/, April 24, 2011



程光权 国防科学技术大学信息系统与管理学院讲师. 主要研究方向为小波理论, 图像处理, 图像质量评价. 本文通信作者. E-mail: cgq299@163.com

(**CHENG Guang-Quan** Lecturer at the College of Information System and Management, National University of Defense Technology. His research interest covers wavelet theory, image processing, and image quality assessment. Corresponding author of this paper.)

interest covers wavelet theory, image processing, and image quality assessment. Corresponding author of this paper.)



张继东 国防科学技术大学理学院训练部参谋, 助理工程师. 主要研究方向为系统科学, 科研和学术管理.

E-mail: zhangjidong@nudt.edu.cn

(**ZHANG Ji-Dong** Brainman and assistant engineer in the Department of Training, College of Science, National University of Defense Technology. His research interest covers system science and scientific research management.)

His research interest covers system science and scientific research management.)



成礼智 国防科学技术大学理学院教授. 主要研究方向为图像处理与调和分析.

E-mail: chenglz@vip.sina.com

(**CHENG Li-Zhi** Professor at the College of Science, National University of Defense Technology. His research interest covers image processing and computational harmonic analysis.)



黄金才 国防科学技术大学信息系统与管理学院教授. 主要研究方向为数据挖掘, 系统仿真.

E-mail: huangjincai@nudt.edu.cn

(**HUANG Jin-Cai** Professor at the College of Information System and Management, National University of Defense Technology. His research interest covers data mining and system simulation.)

est covers data mining and system simulation.)



刘忠 国防科学技术大学信息系统与管理学院教授. 主要研究方向为信息管理, 计划生成支撑技术.

E-mail: liuzhong@nudt.edu.cn

(**LIU Zhong** Professor at the College of Information System and Management, National University of Defense Technology. His research interest covers information management and decision-making support technology.)

covers information management and decision-making support technology.)